

# Melhoramento Tecnológico por Modificação Térmica de Madeiras Portuguesas

**Bruno Esteves<sup>1</sup>, Idalina Domingos<sup>1</sup> e Helena Pereira<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Escola Superior de Tecnologia de Viseu, Depto. de Engenharia e Madeiras, Campus Politécnico, 3504-510 VISEU.

<sup>2</sup>Instituto Superior de Agronomia, Centro de Estudos Florestais, 1349-017 LISBOA

**Resumo.** O tratamento térmico da madeira diminui a humidade de equilíbrio e melhora a estabilidade dimensional e a resistência à biodegradação, deste modo permitindo-lhe a utilização no exterior sem produtos químicos de preservação. Este tratamento poderá atribuir um maior valor acrescentado às madeiras portuguesas competindo com as madeiras tropicais de custo mais elevado.

O tratamento térmico da madeira de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e de pinheiro (*Pinus pinaster*) foi feito em estufa com ar aquecido a 170, 180, 190 e 200 °C e em autoclave com uma mistura de ar sobreaquecido e saturado a 190, 200 e 210 °C. Para diferentes tempos de tratamento foram determinadas as perdas de massa e calculou-se a humidade de equilíbrio e o aumento da estabilidade dimensional (ASE, Anti Shrinking Efficiency) entre amostras tratadas e não tratadas em ambientes com 35, 65 e 85% de humidade relativa, nas direcções radial e tangencial.

A perda de massa foi maior em estufa para o pinheiro e em autoclave para o eucalipto. A humidade de equilíbrio da madeira tratada termicamente diminui cerca de 50% ou mais: em estufa, a humidade de equilíbrio a 35% de humidade relativa diminuiu 57 e 67% para o pinheiro e eucalipto, respectivamente, e em autoclave 46 e 67%. A estabilidade dimensional da madeira após tratamento térmico melhorou, aumentando com a temperatura e tempo de tratamento, principalmente em estufa. Por exemplo, o ASE<sub>35%</sub> radial para a madeira de eucalipto foi 87% para o tratamento em estufa e 73% para o pinho. O ASE<sub>35%</sub> tangencial foi na maioria dos casos ligeiramente superior ao radial.

**Palavras chave :** Tratamento térmico, perda de massa, *Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus*, estabilidade dimensional, humidade de equilíbrio

## Introdução

A preservação da madeira tem um papel preponderante na conservação dos recursos florestais pois permite aumentar consideravelmente o tempo de vida dos produtos de madeira. No entanto, os preservantes actuais são compostos químicos com elevada toxicidade e, portanto, com um impacte ambiental negativo. Os problemas surgem, não só devido à perda de compostos químicos da madeira em obra e no processo de tratamento mas, principalmente, no destino a dar à madeira tratada findo o seu período de utilização.

Das duas principais espécies florestais em Portugal, a madeira de pinheiro bravo é considerada pouco durável e a de eucalipto não durável segundo a norma NP EN 350-2, pelo que não podem, ou não devem, ser utilizadas no exterior sem tratamento. Além disso, a madeira de eucalipto é de difícil impregnação, só possível para pequenos diâmetros sem cerne mas com perda de produto preservador devido ao grande diâmetro dos vasos e mesmo tratada, é atacada por fungos de podridão mole (Reimão e Nunes 1989).

O uso de tratamentos térmicos para alterar as propriedades da madeira não é novo e os primeiros estudos para melhorar a estabilidade dimensional da madeira foram realizados por Stamm *et al.* (1946). Mais recentemente, as preocupações ambientais incentivaram a procura de métodos que atribuíssem um maior valor acrescentado à madeira, sem a utilização de produtos químicos, pelo que o tratamento térmico voltou a ser equacionado. Surgiram vários processos, alguns dos quais comerciais, nomeadamente, o processo Termowood na Finlândia

(Viitaniemi 1997), o processo Plato na Holanda (Boostrá *et al* 1998), Rectification (Dirol e Guyonnet 1993) e Bois-Perdure em França e OHT na Alemanha (Sailer *et al* 2000).

Com este trabalho pretende-se melhorar, por modificação térmica, as propriedades das madeiras de eucalipto e de pinheiro de modo a obter um produto com maior valor acrescentado e que possa ser utilizado em condições ambientais mais desfavoráveis.

## **Material e Métodos**

Foram ensaiadas madeiras de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e pinheiro (*Pinus pinaster*). Em relação ao eucalipto utilizou-se uma placa de um eucalipto de grandes dimensões (aproximadamente 1 metro de diâmetro à altura do peito), proveniente de Águeda, constituída principalmente por cerne. No caso do pinho utilizou-se borne de um pinheiro proveniente da mesma região.

Prepararam-se amostras cúbicas, com 40 mm de aresta, de madeira isenta de nós, bolsas de resina ou outras singularidades, com faces paralelas às direcções radial, tangencial e longitudinal. As amostras foram estabilizadas durante três semanas numa sala condicionada a 50 % de humidade relativa e 20 °C. Determinou-se a humidade de equilíbrio e a massa de todas as amostras.

### Tratamento térmico em estufa

As amostras estabilizadas foram sujeitas a um tratamento térmico numa estufa com a presença de ar durante 2, 4, 6, 8, 12 e 24 horas e temperaturas de 170, 180, 190 e 200 °C. O tempo de aquecimento até à temperatura de funcionamento foi de uma hora. Utilizaram-se quatro amostras em cada ensaio, totalizando um total de 96 amostras de cada uma das espécies. No final do tratamento térmico, todas as amostras permaneceram durante uma hora no exsiccador e em seguida foram pesadas. Determinou-se a perda de massa de cada provete em relação à massa seca inicial.

### Tratamento térmico em autoclave

O tratamento térmico em autoclave foi realizado num protótipo industrial para tratamento térmico da cortiça, instalado numa unidade industrial para produção de aglomerado negro de cortiça. A autoclave é paralelepípedica com dimensões interiores de 1 m x 1 m x 0,5 m. O aquecimento das paredes é feito por uma camisa que contém um tubo onde circula ar sobreaquecido e o aquecimento do interior é feito por uma mistura de ar sobreaquecido e sobressaturado que entra por um tubo lateral localizado no fundo da autoclave.

As amostras foram encerradas dentro de uma caixa de rede metálica para não contactarem entre si. As temperaturas de ensaio foram 190, 200 e 210 °C. O aquecimento na autoclave foi feito lentamente até 130 °C por intermédio da camisa e entre 130 °C e a temperatura de trabalho o aquecimento foi rápido com a introdução de uma mistura de vapor saturado e sobreaquecido. A temperatura do tratamento foi mantida através do aquecimento pela camisa da autoclave. A temperatura foi controlada por intermédio de um termopar introduzido no meio da autoclave. As amostras foram retiradas da autoclave depois de 2, 4, 6, 8 e 12 horas após o início do tratamento que se considerou ser quando a temperatura desejada se atingiu.

## Determinação da humidade de equilíbrio e estabilidade dimensional

Após o tratamento térmico, as amostras foram colocadas num exsiccador durante 1 hora, após o que foram pesadas e medidas na direcção radial, tangencial e transversal. Em seguida, as amostras tratadas, juntamente com amostras não tratadas foram colocadas numa estufa com controlo de humidade a 20 °C e com humidades relativas sucessivamente de 35%, 65% e 85%. As amostras foram mantidas à mesma humidade e temperatura durante cerca de três semanas, até apresentarem a mesma massa em dois dias consecutivos. Após a estabilização, mediram-se a massa e as dimensões de todas as amostras nas direcções radial, tangencial e transversal.

Determinou-se a humidade de equilíbrio dos provetes e a variação dimensional segundo as três direcções para cada humidade relativa. Calculou-se a eficiência do aumento da estabilidade dimensional (ASE -Anti Shrinking Efficiency) entre as amostras tratadas e não tratadas, como mostra o exemplo seguinte para a humidade relativa a 35%:

$$ASE (\%) = \frac{(I_{nt} - I_t)}{I_{nt}} * 100 \quad \text{Onde} \quad I(\%) = \frac{(L_{35\%} - L_{0\%})}{L_{0\%}} * 100$$

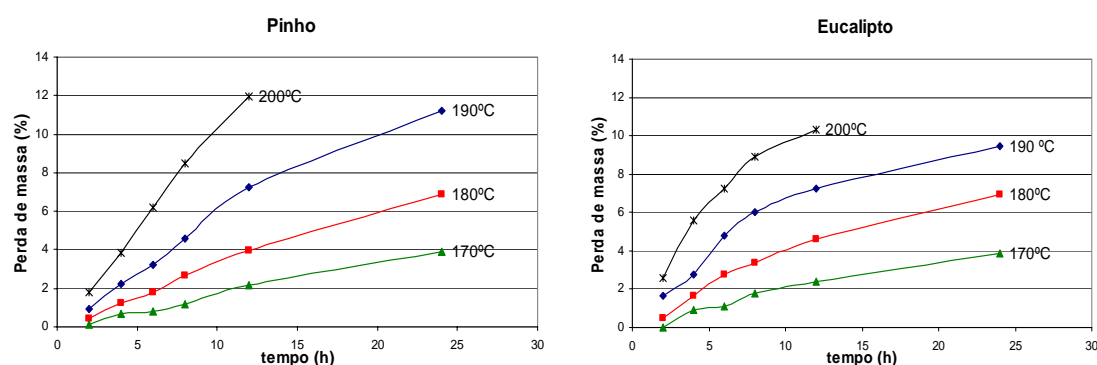
sendo I= inchamento; nt=não tratada; L<sub>35%</sub>=dimensão a 35% de hr; L<sub>0%</sub>=dimensão do provete seco

Foram feitos os cálculos para humidades relativas de 35%, 65% e 85%. Os valores de ASE<sub>35%</sub>, ASE<sub>65%</sub> e ASE<sub>85%</sub> correspondem à diferença entre as dimensões à humidade relativa correspondente e as dimensões do provete seco, calculados para a direcção radial, tangencial e total que corresponde à variação de volume.

## **Resultados e Discussão**

### Perda de massa

A Figura 1 mostra a evolução da perda de massa ao longo do tempo para as temperaturas de 170, 180, 190 e 200 °C para a madeira de pinheiro e eucalipto tratada em estufa na presença de ar. Verificou-se que a perda de massa aumenta ao longo do tempo para todas as temperaturas. A velocidade de perda de massa foi maior na parte inicial do tratamento, até 8h e 12 h respectivamente para a madeira de eucalipto e de pinheiro. A perda de massa para as mesmas condições de tratamento foi em geral maior para a madeira de eucalipto, principalmente para tratamentos mais curtos.



**Figura 1.** Perda de massa em estufa a 170, 180, 190 e 200 °C ao longo do tempo para a madeira de pinheiro e eucalipto.

Verifica-se que a mesma perda de massa pode ser obtida a diferentes temperaturas, dependendo do tempo de tratamento. Por exemplo, para a madeira de pinheiro, uma perda de

3 % em massa pode ser obtida à temperatura de 170 °C em 17 h, a 180 °C em 9 h, a 190 °C em 5 h e a 200 °C em apenas 3 h.

A perda de massa por tratamento térmico em autoclave na ausência de oxigénio está apresentada no Quadro 1 que mostra a variação da perda de massa, ao longo do tempo para as temperaturas de 190, 200 e 210 °C. Verificou-se que a perda de massa aumenta ao longo do tempo, tanto para a madeira de pinheiro como para a de eucalipto. A perda de massa da madeira de eucalipto tratado em autoclave foi superior à perda de massa da madeira de pinheiro, sendo as diferenças maiores do que as verificadas para o tratamento em estufa.

**Quadro 1.** Variação da perda de massa em autoclave, na ausência de oxigénio, a 190°C, 200°C e 210 °C ao longo do tempo para o pinheiro e eucalipto.

Espécie	Tempo de tratamento ( h )	Perda de Massa (%)		
		190 °C	200 °C	210 °C
Pinheiro	2	0,4	2,1	4,4
	4	0,9	2,2	4,1
	6	3,5	3,5	6,8
	8	2,5	4,8	7,8
	12	3,7	4,4	7,3
Eucalipto	2	5,4	3,7	10,4
	4	5,2	6,7	9,8
	6	7,6	10,2	13,9
	8	9,0	10,0	13,0
	12	8,7	12,1	14,5

As perdas de massa da madeira de pinheiro em autoclave a 210 °C para 4 h (4,1%), 6 h (6,8%) e 8 h (7,8%) não são muito diferentes das observadas por Zaman *et al* (2000) em ensaios com *Pinus sylvestris* que variaram entre 5,7 e 7,0% com um tratamento a 205 °C. Para a madeira de *Betula pendula*, o mesmo autor obteve para os mesmos tempos e temperatura perdas de massa de 6,4%, 7,1% e 10,2%, valores que não estão muito distantes dos 9,8%, 13,9% e 13,0% obtidos para a temperatura de 210 °C com a madeira de eucalipto.

A perda de massa da madeira de pinheiro foi maior na presença de ar (em estufa) do que na ausência deste (em autoclave) o que seria de esperar devido a reacções de oxidação. A perda de massa no eucalipto foi, no entanto, menor em estufa do que em autoclave.

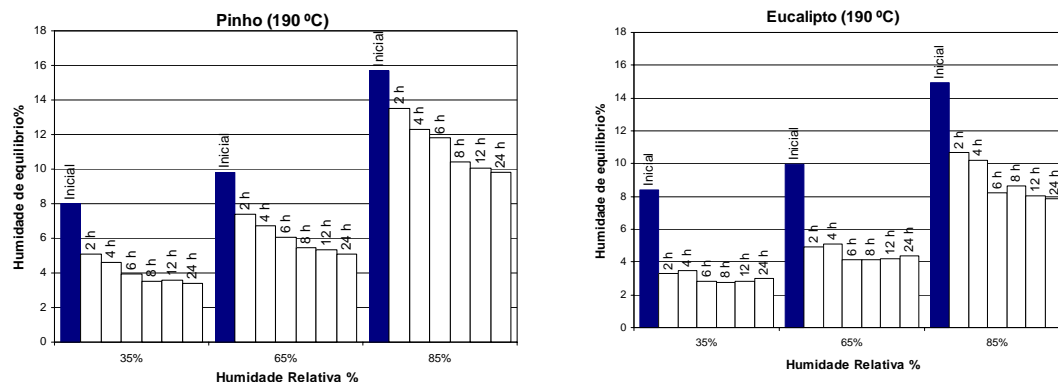
#### Humidade de equilíbrio da madeira

De uma maneira geral verifica-se que a humidade de equilíbrio da madeira tratada termicamente diminui sendo menor com o aumento do tempo de tratamento para todas as temperaturas estudadas. A curva de equilíbrio higroscópico para a madeira tratada é semelhante à da madeira não tratada apresentando apenas valores menores.

A Figura 2 representa a variação da humidade de equilíbrio higroscópico da madeira de pinheiro e eucalipto tratadas em estufa a 190 °C com diferentes tempos de tratamento para humidades relativas de 35 %, 65 % e 85 %. Verifica-se que as madeiras tratadas diminuem a sua humidade de equilíbrio higroscópico principalmente para uma humidade relativa de 35%. Os resultados foram semelhantes para as duas madeiras embora a diminuição da humidade de equilíbrio higroscópico tenha sido maior no caso do eucalipto.

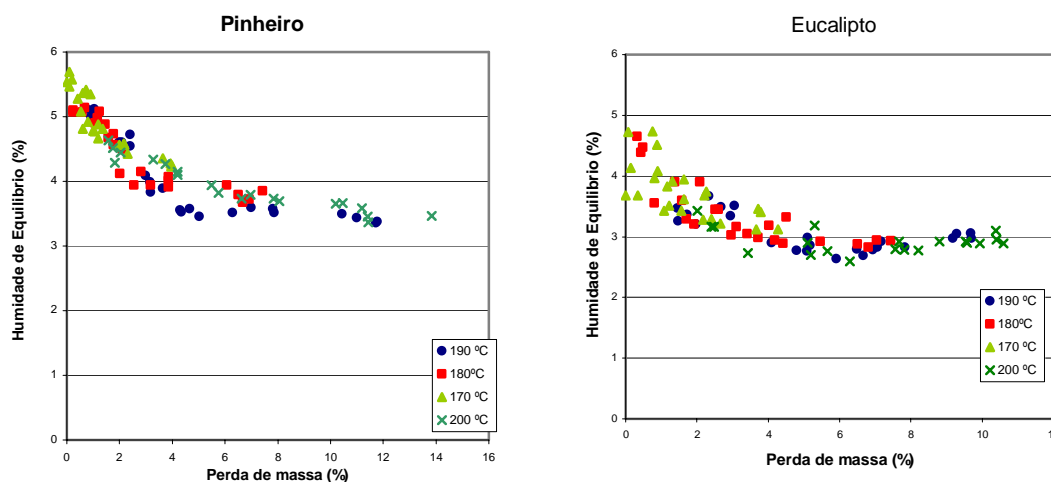
A humidade de equilíbrio a 35% de humidade relativa da madeira de pinheiro com 24 h de tratamento diminui 46%, 53%, 57% e 56% em relação à humidade inicial, respectivamente para 170°C, 180°C, 190°C e 200 °C. A redução na humidade de equilíbrio higroscópico a 65 e 85% de humidade relativa foi inferior, diminuindo no máximo 48% e 46% respectivamente. No caso da madeira de eucalipto, a humidade de equilíbrio higroscópico para

35% de humidade relativa diminuiu, para amostras com 24 h de tratamento, de 61%, 69%, 67% e 67% em relação à humidade inicial, para 170°C, 180°C, 190°C e 200 °C, enquanto que para humidades relativas de 65% e 85 %, a humidade de equilíbrio diminuiu apenas 59% e 48% respectivamente.



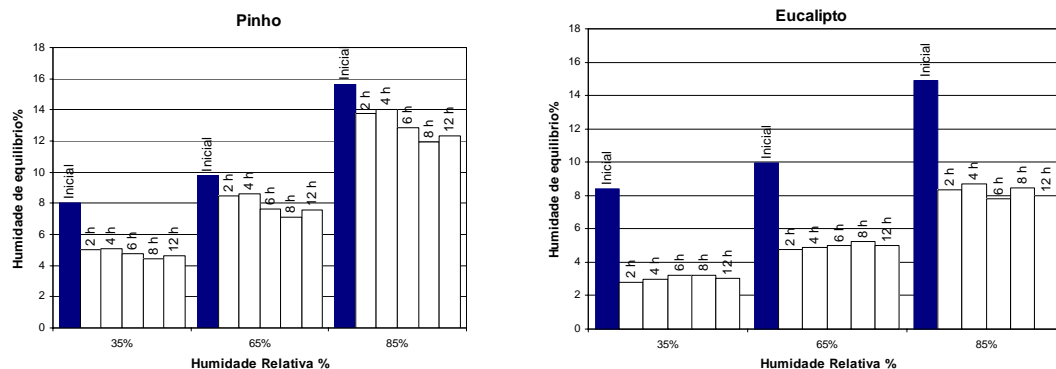
**Figura 2.** Variação da humidade de equilíbrio higroscópico da madeira de pinheiro e eucalipto tratadas em estufa a 210 °C para humidades relativas do ar de 35%, 65% e 85%.

A variação da humidade de equilíbrio higroscópico está relacionada com a perda de massa (Figura 3), verificando-se que diminui mais, principalmente para perdas de massa até 4%.



**Figura 3.** Variação da humidade de equilíbrio com a perda de massa da madeira de pinheiro e eucalipto tratada em estufa para a humidade relativa de 35%.

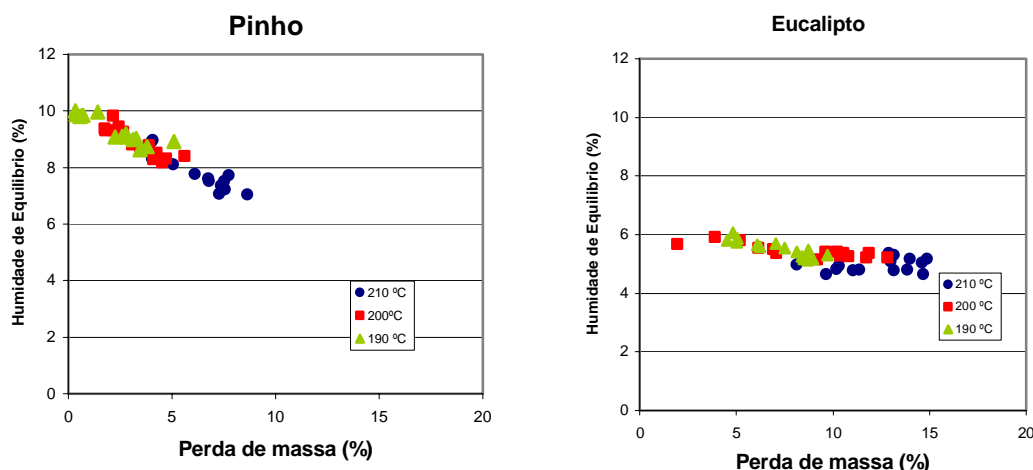
A humidade de equilíbrio das amostras tratadas em autoclave é inferior à das amostras iniciais, como mostra a Figura 4 para o tratamento a 210°C. Para a madeira de pinheiro a humidade de equilíbrio a 35% de humidade relativa diminuiu 36%, 37% e 46% para 190°C, 200°C e 210 °C e para a madeira de eucalipto 55%, 59% e 61% respectivamente. A humidades relativas de 65% e 85% a diminuição máxima foi de 34% e 35% para o pinheiro e 54% e 46% para o eucalipto.



**Figura 4.** Variação da humidade de equilíbrio higroscópico da madeira de pinheiro e eucalipto tratadas em autoclave a 190 °C para as humidades relativas de 35%, 65% e 85%.

A humidade de equilíbrio das amostras tratadas em autoclave diminui linearmente com o aumento da perda de massa quer para a madeira de pinheiro, quer para o eucalipto (Figura 5)

As amostras de pinho e eucalipto tratadas em autoclave apresentam uma humidade de equilíbrio ligeiramente superior às tratadas em estufa para a mesma perda de massa.



**Figura 5.** Variação da humidade de equilíbrio com a perda de massa da madeira de pinho e eucalipto tratada em autoclave para a humidade relativa (Hr) de 65%.

### Estabilidade dimensional

Calculou-se a eficiência do aumento da estabilidade dimensional correspondendo à diminuição de retracção (ASE) para as amostras de madeira de pinheiro e eucalipto tratadas térmicamente colocadas em ambientes com humidades relativas de 35%, 65% e 85%. Estes valores de ASE permitem determinar melhor o comportamento da madeira em condições normais de funcionamento.

O Quadro 2 apresenta um exemplo dos valores obtidos para o ASE<sub>35%</sub> da madeira de pinheiro e eucalipto, nas direcções radial, tangencial e total. Em relação à estabilidade dimensional da madeira de pinheiro verificou-se que mesmo para tempos curtos de tratamento (2 h), os valores de ASE<sub>35%</sub> radial variaram entre 46 e 62%. O ASE<sub>35%</sub> radial aumenta com a temperatura e tempo de tratamento com máximos de 65% a 170 °C, 63% a 180 °C, 64% a 190 °C e 73% a 200 °C (Quadro 2). Em relação à madeira de eucalipto, a variação é semelhante e os valores são sempre superiores a 50%, atingindo 76%, 85%, 89% e 88 % para 170°C,

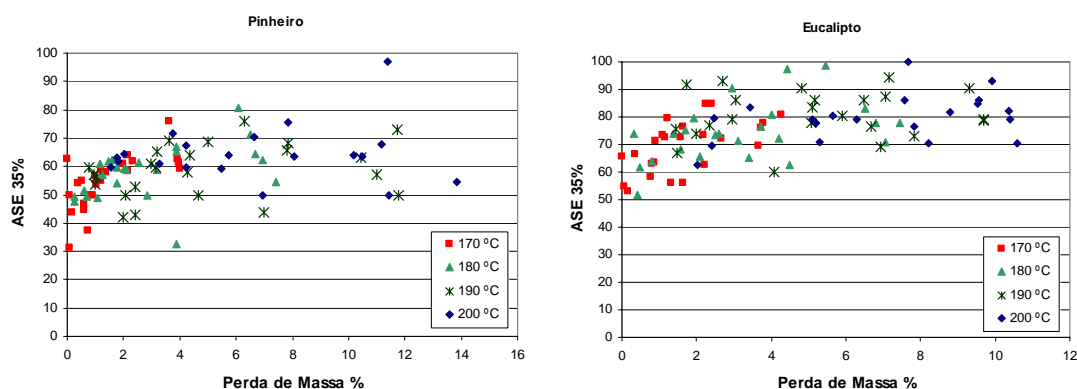
180°C, 190°C e 200 °C respectivamente. Os resultados para a direcção tangencial são semelhantes embora na maioria dos casos com valores superiores ao do radial.

**Quadro 2.** Variação do ASE<sub>35%</sub> radial, tangencial e total com o tempo de tratamento para as temperaturas de 170°C, 180°C, 190°C e 200 °C para a madeira de pinheiro e eucalipto tratadas em estufa.

Temp. °C	Tempo (h)	Pinheiro			Eucalipto		
		Radial	Tangencial	Total	Radial	Tangencial	Total
170	2	46,0	59,9	56,8	60,1	71,7	69,5
	4	45,3	65,9	55,1	66,4	69,8	65,6
	6	52,3	62,1	56,3	68,0	75,0	72,7
	8	56,8	69,3	65,1	69,7	76,5	74,3
	12	61,2	69,3	66,7	76,1	78,2	77,7
	24	64,9	72,8	70,2	76,1	84,0	81,3
180	2	49,4	78,3	68,3	62,7	68,7	66,8
	4	57,2	74,8	68,8	74,2	80,5	78,4
	6	58,6	66,0	63,6	73,7	79,8	77,8
	8	59,8	72,6	69,3	73,4	80,3	78,0
	12	61,5	76,7	71,5	84,8	84,3	84,6
	24	63,0	78,0	68,8	77,5	94,6	88,4
190	2	56,7	61,5	60,0	77,0	72,6	74,4
	4	45,9	67,6	59,5	83,6	83,3	83,6
	6	63,7	73,2	70,0	78,5	85,7	83,2
	8	63,6	73,3	69,1	81,6	90,6	87,5
	12	63,5	74,3	70,7	81,1	87,6	85,4
	24	64,4	74,7	70,0	88,7	95,7	93,2
200	2	62,1	65,1	64,3	73,9	80,6	78,3
	4	64,9	75,4	71,9	79,2	84,0	82,4
	6	64,5	73,7	76,9	75,9	87,9	82,6
	8	66,7	66,7	66,9	88,1	79,7	83,0
	12	73,2	80,0	74,5	81,1	87,0	85,0

O ASE<sub>65%</sub> tem um comportamento semelhante ao ASE<sub>35%</sub> em ambas as direcções embora apresente valores mais baixos. No caso do ASE<sub>85%</sub> radial os valores obtidos são bastante inferiores aos de 65% com valores máximos de 31%, 40%, 36%, e 39% para a madeira de pinheiro e 39%, 45%, 53% e 50% para o eucalipto a 170°C, 180°C, 190°C e 200°C.

O ASE<sub>35%</sub> radial (Figura 6) aumenta com a perda de massa, sendo o aumento inicial maior, tendendo para um valor máximo para perdas de massa superiores. O mesmo se verifica para o ASE<sub>65%</sub> e ASE<sub>85%</sub> e para a direcção tangencial.



**Figura 6.** Variação do ASE<sub>35%</sub> radial com a perda de massa para a madeira de pinheiro e eucalipto tratadas em estufa.

Em relação ao tratamento em autoclave, o comportamento é semelhante ao verificado com o tratamento em estufa. Os ASE<sub>35%</sub>, 65% e 85% radial e tangencial aumentam com o tempo de tratamento. Observa-se que em relação ao tratamento em estufa os valores apresentam uma maior dispersão o que ficará a deve-se à heterogeneidade da temperatura dentro da autoclave.

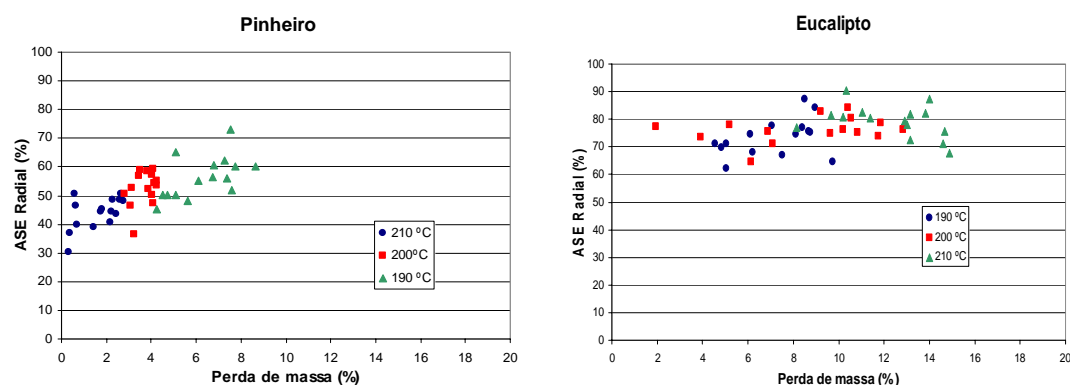
Verifica-se que não existem grandes diferenças entre a direcção radial e tangencial, apesar de a direcção tangencial apresentar valores ligeiramente superiores de ASE o que corresponde um maior aumento de estabilidade. Uma vez que as variações dimensionais são maiores na direcção tangencial é de esperar que a sua maior diminuição relativa dê origem a um aumento de estabilidade mais elevado.

O comportamento para as humidades relativas de 35%, 65% e 85% é semelhante, apenas diferindo na ordem de grandeza dos valores.

**Quadro 3.** Variação do ASE<sub>35%</sub> radial, tangencial e total com o tempo de tratamento para 190°C, 200°C e 210 °C para a madeira de pinheiro e eucalipto tratada em autoclave

Temp. °C	Tempo (h)	Pinheiro			Eucalipto		
		Radial	Tangencial	Total	Radial	Tangencial	Total
190	2	39,4	39,3	40,1	80,6	69,7	75,2
	4	33,9	41,7	35,4	75,3	69,3	79,5
	6	26,6	50,6	43,4	89,8	73,1	78,6
	8	45,0	48,3	41,8	73,3	72,3	71,4
	12	38,8	56,1	48,2	77,2	82,4	80,3
200	2	30,9	42,9	35,9	72,8	76,2	66,8
	4	37,8	46,8	51,9	65,7	70,4	68,8
	6	43,8	52,5	50,5	69,4	75,4	73,9
	8	21,1	50,8	37,4	69,9	82,5	76,2
	12	38,6	47,6	44,9	61,4	76,4	67,0
210	2	35,7	53,3	41,7	77,7	80,8	79,0
	4	44,4	55,7	52,3	83,5	83,3	80,8
	6	40,9	62,9	53,4	59,3	78,3	73,5
	8	56,8	58,0	48,0	73,9	76,6	78,3
	12	37,3	57,5	51,2	69,2	76,9	72,2

Em relação à variação da estabilidade dimensional, observa-se que quer o ASE radial, quer o tangencial para todas as humidades relativas estudadas e para ambas as madeiras aumenta com a perda de massa (Figura 7). O aumento parece ser mais pronunciado no caso da madeira de pinheiro mas as perdas de massa são menores comparadas com as do eucalipto.



**Figura 7.** Variação do ASE<sub>35%</sub> radial com a perda de massa para as temperaturas de 190°C, 200°C e 210 °C para a madeira de pinheiro e eucalipto tratadas em autoclave.

## Conclusões

O tratamento térmico, quer em estufa, quer em autoclave, permitiu a melhoria da estabilidade dimensional e a diminuição da humidade de equilíbrio higroscópico das madeiras de pinheiro e eucalipto. A perda de massa é um dos factores mais importantes na melhoria das propriedades de humidade de equilíbrio e estabilidade dimensional da madeira. Não se observaram grandes diferenças em termos de aumento de estabilidade dimensional entre as direcções tangencial e radial, para as humidades relativas de 35%, 65% e 85%.



## Referências

- Boonstra, M., Tjeerdsma, B. e H. Groeneveld (1998) “ Thermal Modification of Non-durable Wood Species. 1. The Plato Technology: thermal modification of wood. The International Research Group on Wood Preservation, Section 4-Processes, 29 Annual Meeting, Maastricht, Junho 14-19, 1998. 13 p.
- Dirol, D. e R. Guyonnet (1993) “Durability by retification process” International Research Group on Wood Preservation, Section 4-Processes, N° IRG/WP 93-40015.
- NP EN 350-2 (2001)- Durabilidade da Madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural de madeira maciça. Parte 2: Guia da durabilidade natural da madeira e da impregnabilidade de espécies de madeira seleccionadas pela sua importância na Europa.
- Reimão, D. e L. Nunes (1989) “Um estudo sobre a impregnabilidade de madeiras redondas de eucalipto comum” Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Sailer, M., Rapp, A. e H. Leithoff (2000) “Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment” International Research Group on Wood Preservation, Section 4-Processes, N° IRG/WP 00-40162.
- Stamm, A., Burr, H. e A. Kline (1946) “Stayb-wood- A Heat stabilized wood, Ind. Eng. Chem, 38 (6), 630-634.
- Viitaniemi, P., Jämsä, S. e H. Viitanen (1997) “Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products” United States Patent N° 5678324 (US005678324).
- Zaman, A., R. Alen e R. Kotilainen (2000) “Thermal behavior of *Pinus sylvestris* and *Betula pendula* at 200-230 °C” Wood and Fiber Science, 32(2), 138-143.